

无传感器磁场定向控制（FOC） 风机控制原理



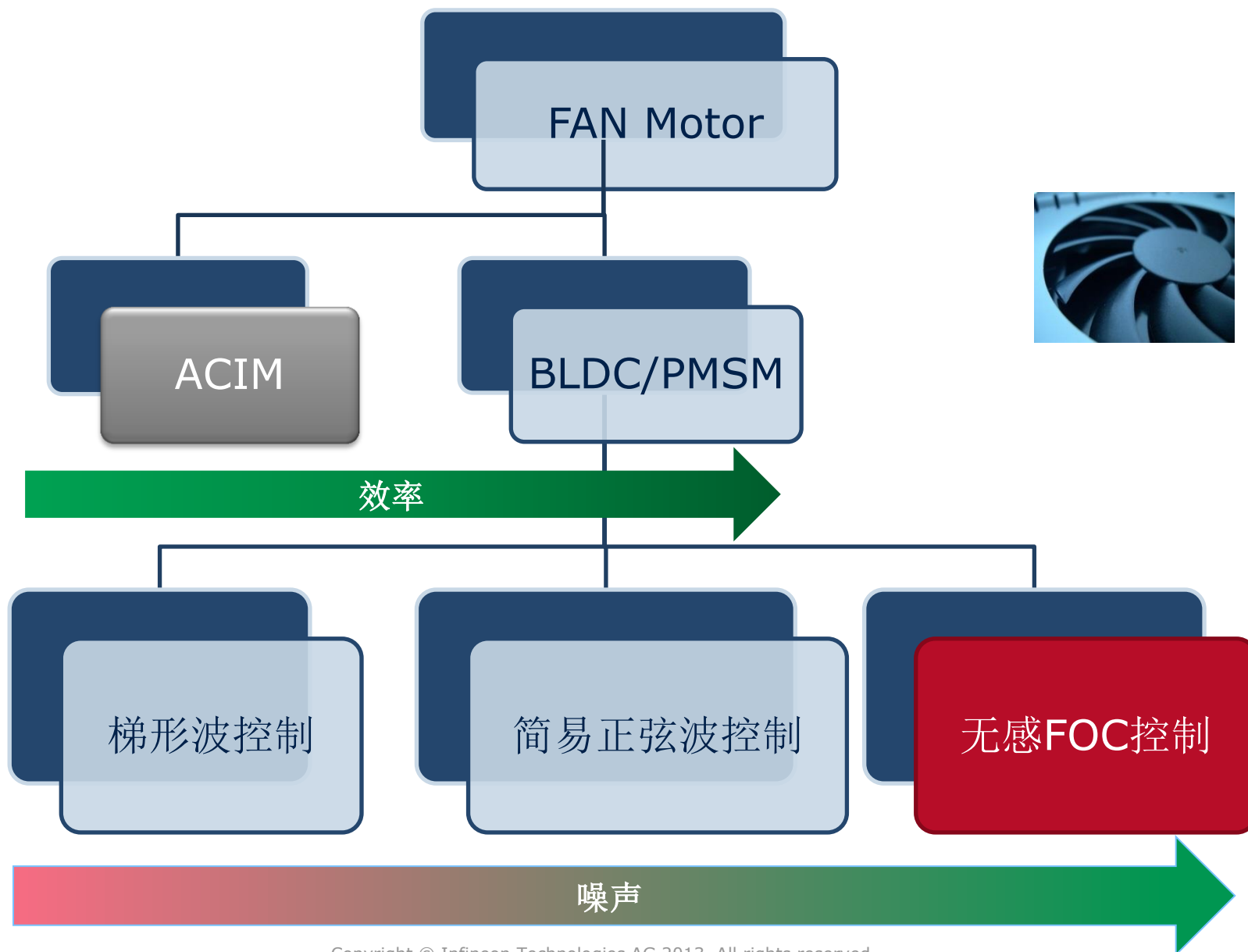
主要内容

- 风机用直流无刷电机
- FOC的控制原理
- 无感FOC的控制原理

主要内容

- 风机用直流无刷电机
- FOC的控制原理
- 无感FOC的控制原理

风机用电机以及控制方式



风机用直流无刷电机

■ 基本组成：定子绕组、转子、机体

□ AC定子电流

□ 转子为永磁体

■ 两种类型

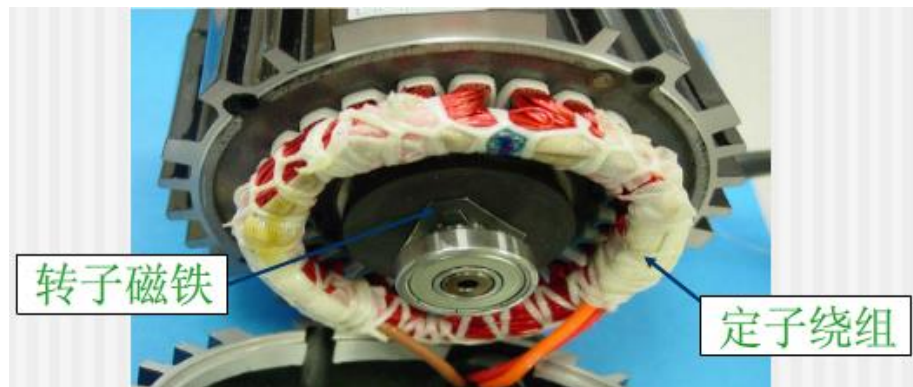
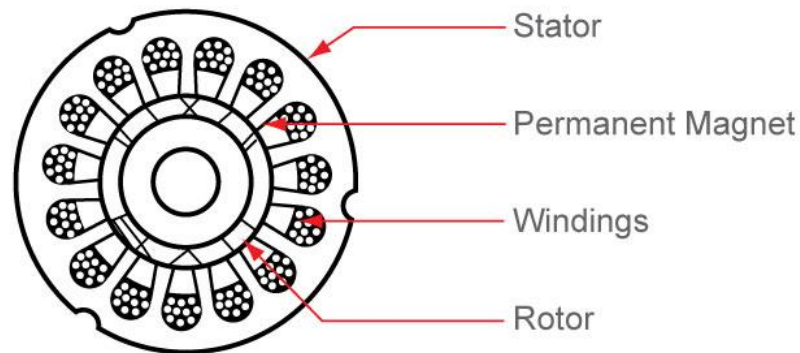
□ BLDC：直流无刷电机

□ PMSM：永磁同步电机

■ 差异性

□ PMSM的反电动势为正弦波

□ BLDC的反电动势为梯形波



主要内容

- 风机用直流无刷电机
- FOC的控制原理
- 无感FOC的控制原理

FOC的基本概念

■ 定义

- FOC——Field Oriental Control，磁场定向控制
- 又称“矢量控制”，是通过控制变频器输出电压的幅值和频率控制三相交流电机的一种变频驱动控制方法。

■ 基本思想

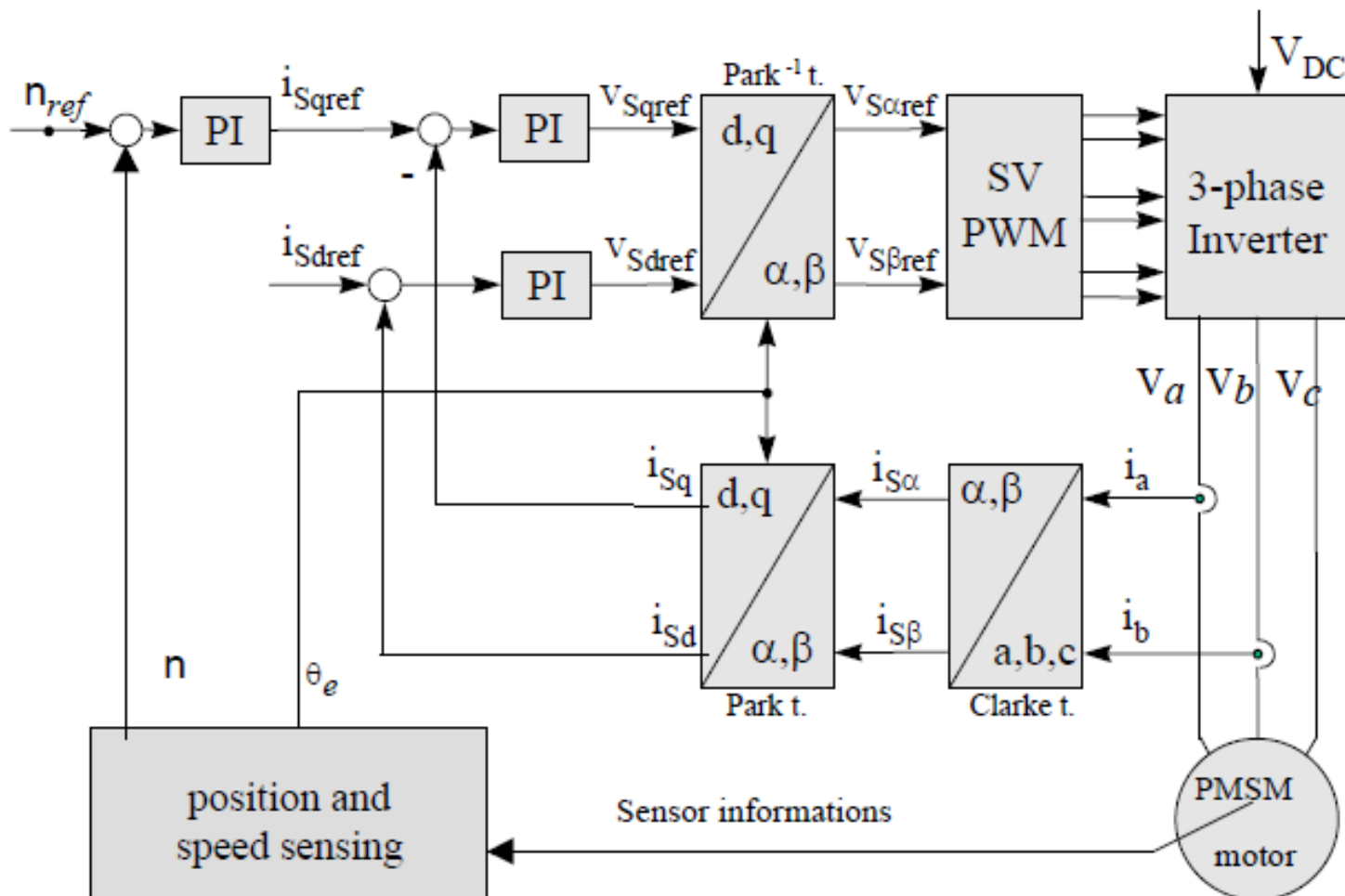
- 通过测量和控制电机的定子电流矢量，根据磁场定向原理分别对电机的励磁电流和转矩电流进行控制，从而将三相交流电机等效为直流电机控制。

■ 实现步骤

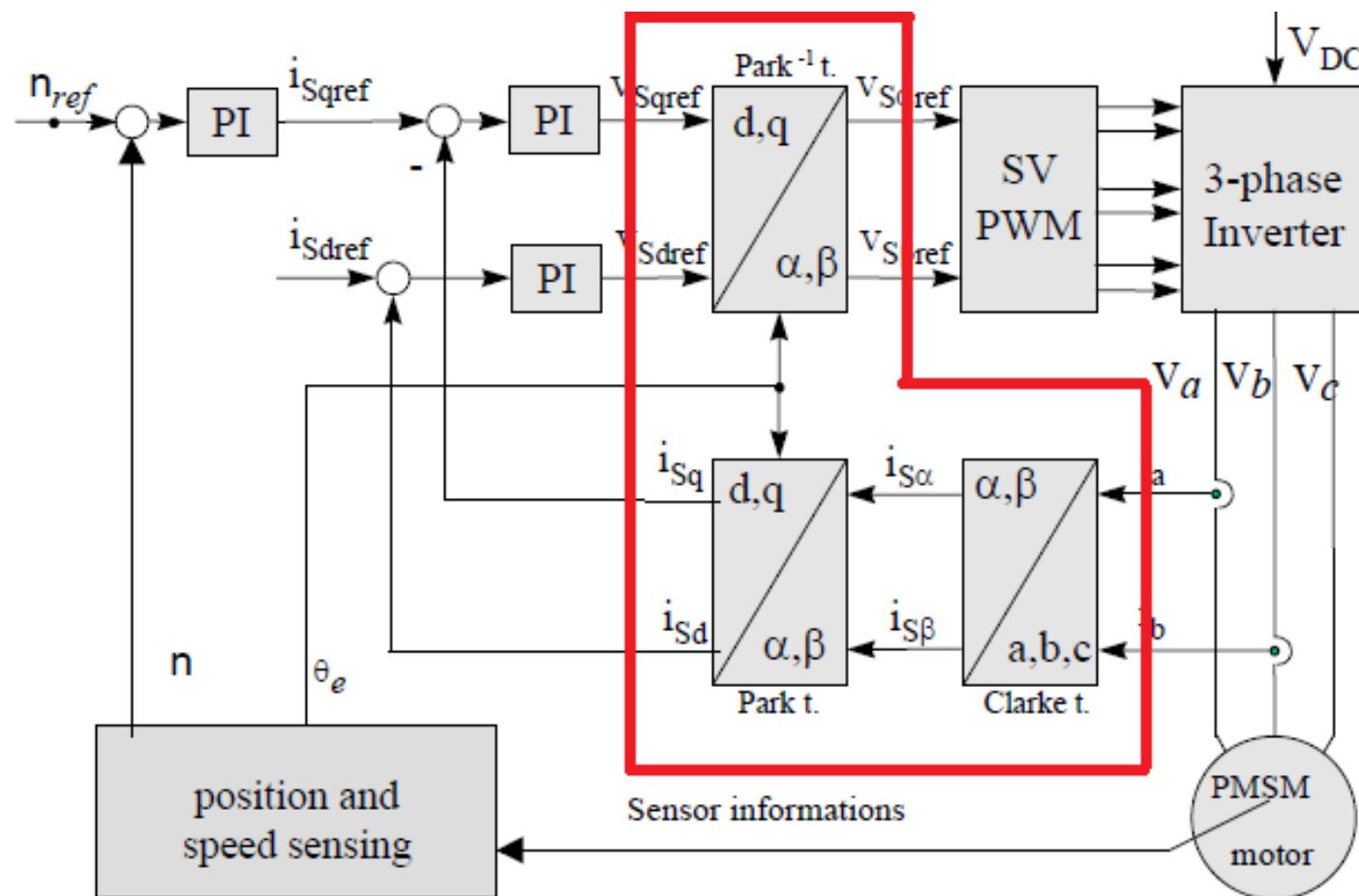
- 通过坐标变换，将三相静止坐标系转化为两相旋转的坐标系，从而使三相交流耦合的定子电流转换为相互正交，独立解耦的转矩与励磁分量，从而到达类似于他励直流电动机通过控制转矩电流直接控制转矩的目的。

FOC的结构框图

■ FOC结构框图



FOC的控制核心——坐标变换



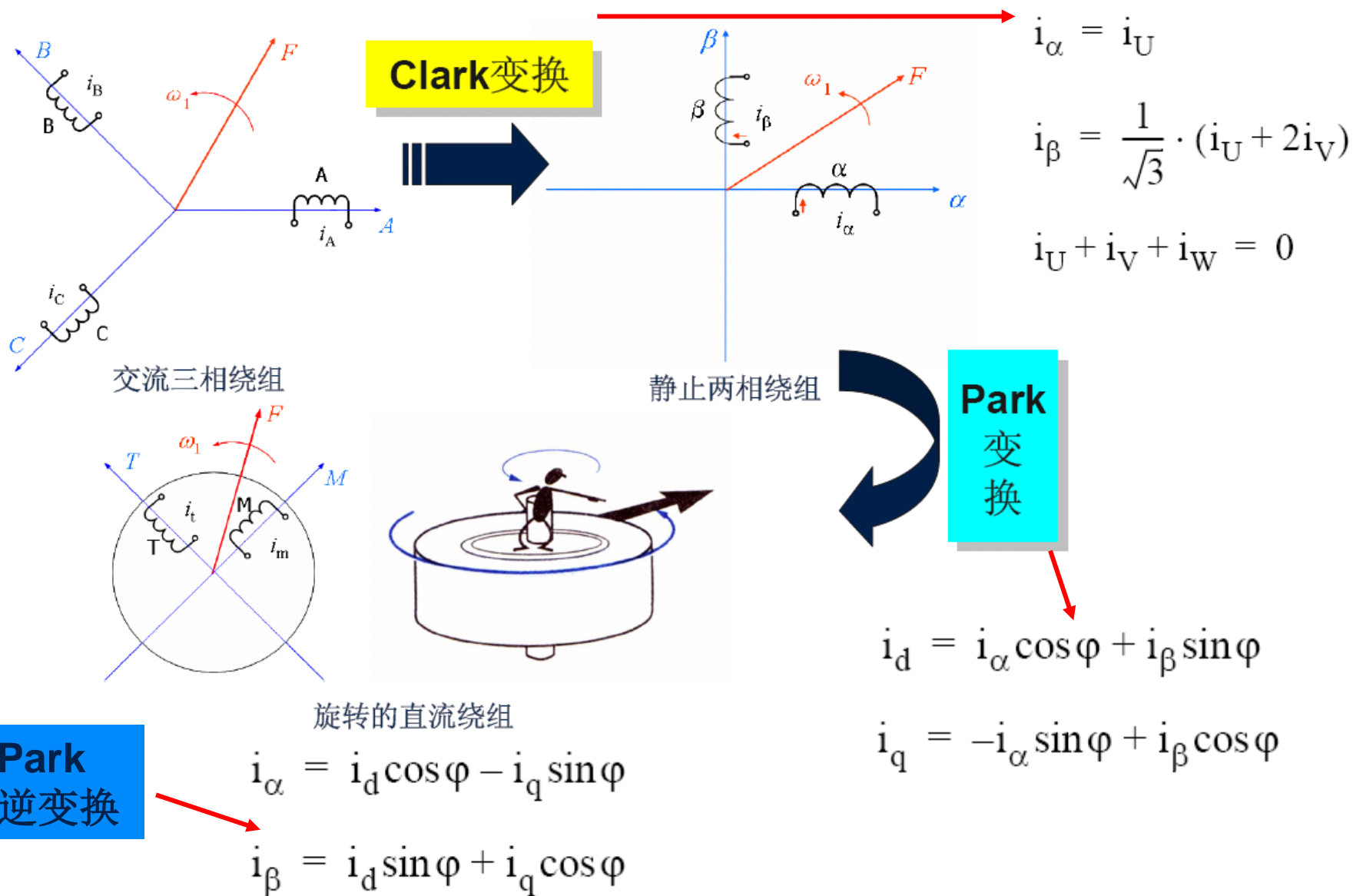
FOC的控制核心——坐标变换

■ 坐标系

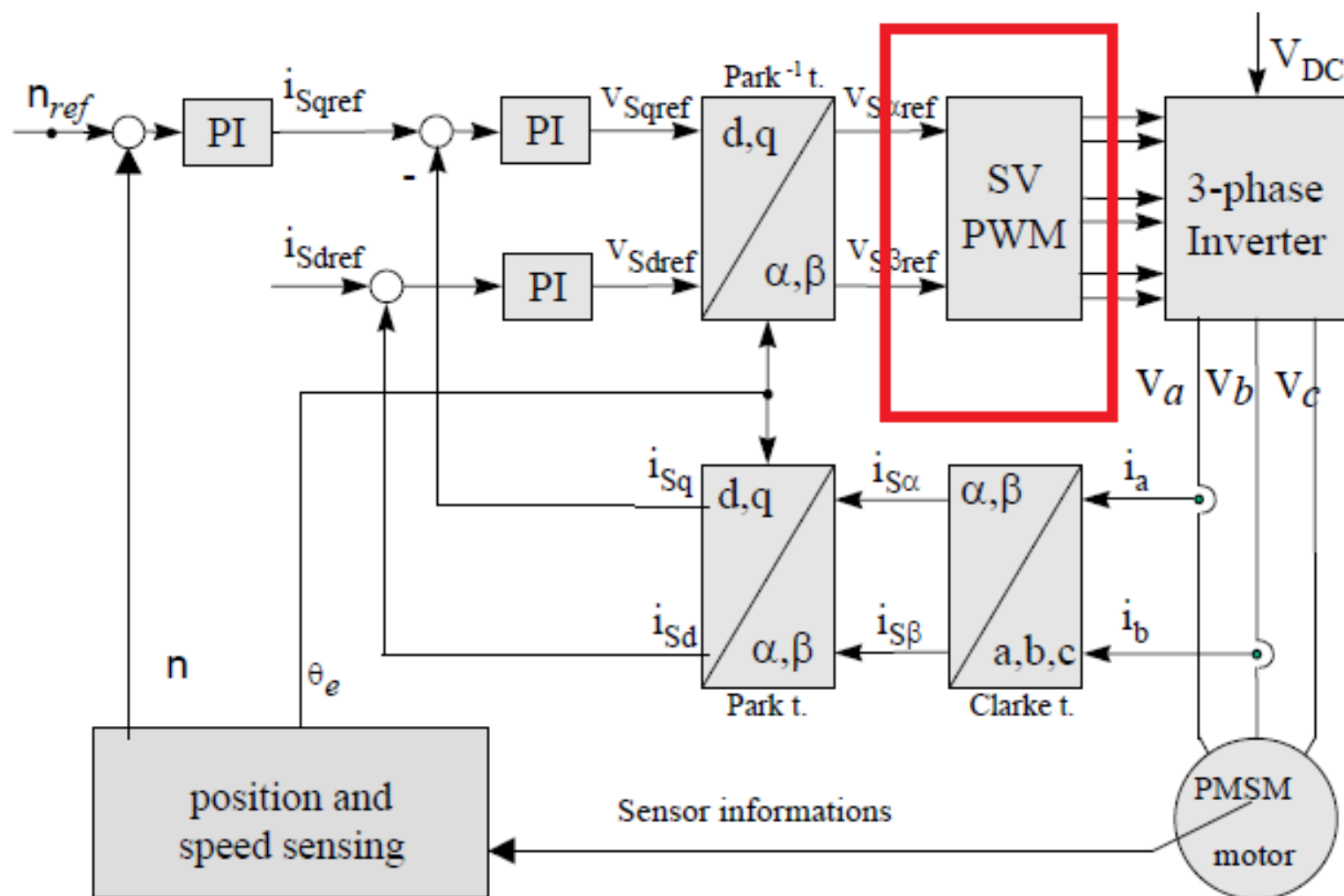
- — 定子坐标系（静止）
 - A—B—C坐标系（三相定子绕组、相差120度）
 - α — β 坐标系（直角坐标系： α 轴与A轴重合、 β 轴超前 α 轴90度）
- — 转子坐标系（旋转）
 - d—q坐标系（d轴—转子磁极的轴线、q轴超前d轴90度）
- — 定向坐标系（旋转）
 - M—T坐标系（M轴固定在定向的磁链矢量上，T轴超前M轴90度）

转子磁场定向控制—— M-T坐标系与d-q坐标系重合

坐标变换过程



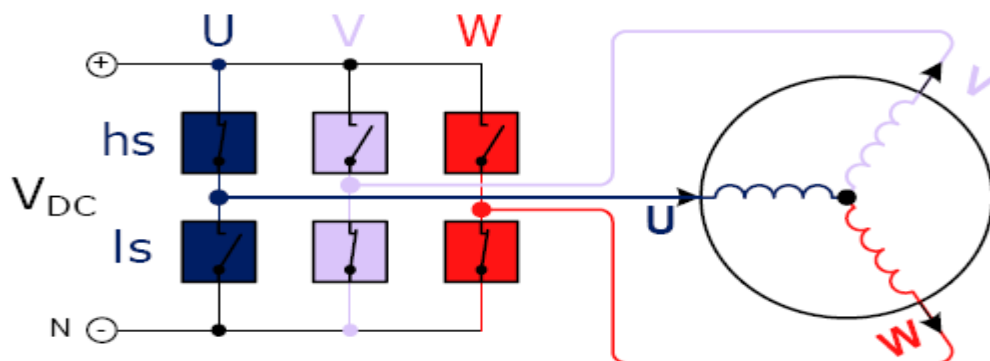
FOC的控制核心——SVPWM



FOC的控制核心——SVPWM

■ 空间矢量

- 根据功率管的开关状态（上管导通是“1”，关闭是“0”）定义了8个空间矢量。其中000和111是零矢量。



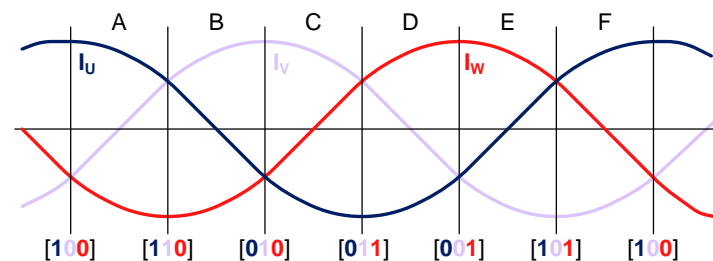
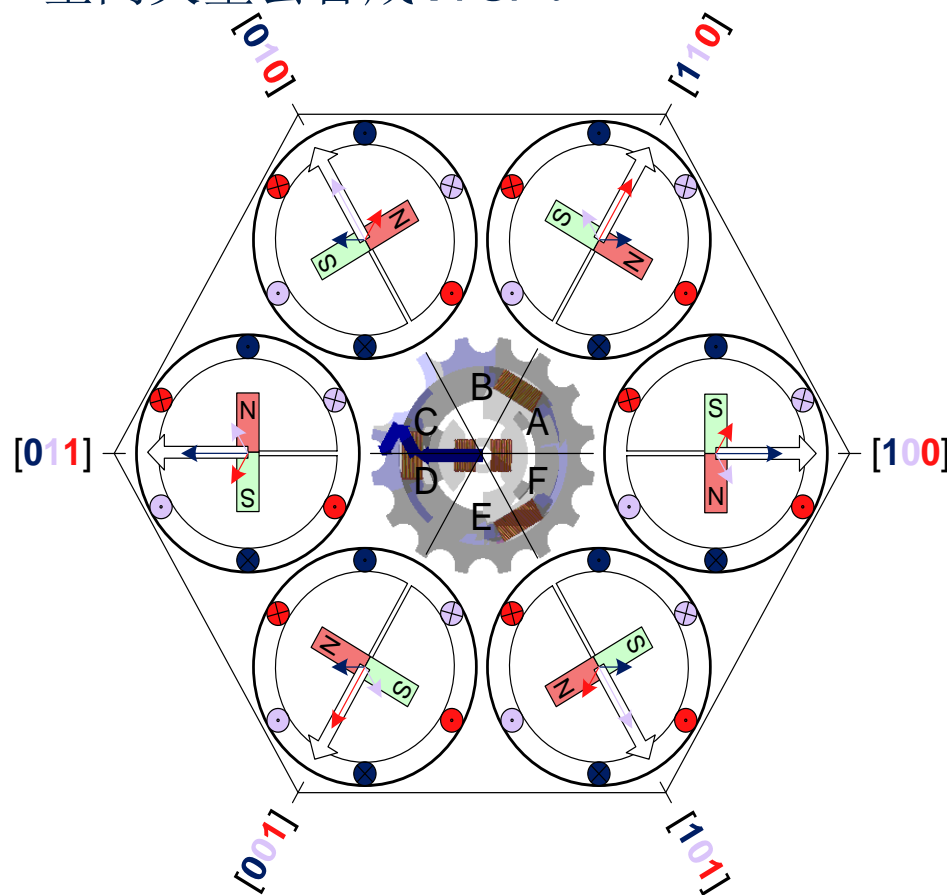
State	U_{hs}	U_{ls}	V_{hs}	V_{ls}	W_{hs}	W_{ls}
000 (passive)	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
100 (active)	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON
110 (active)	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON
010 (active)	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON
011 (active)	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF
001 (active)	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF
101 (active)	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF
111 (passive)	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF

U_α	U_β
0	0
$\sqrt{\frac{2}{3}}U_{DC}$	0
$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$
$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$
$-\sqrt{\frac{2}{3}}U_{DC}$	0
$-\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$
$\sqrt{\frac{1}{6}}U_{DC}$	$-\sqrt{\frac{1}{2}}U_{DC}$
0	0

FOC的控制核心——SVPWM

■ 扇区

- 空间矢量构成6个扇区
- 确定 V_{ref} 位于哪个扇区，才能知道用哪对相邻的基本电压空间矢量去合成 V_{ref} 。

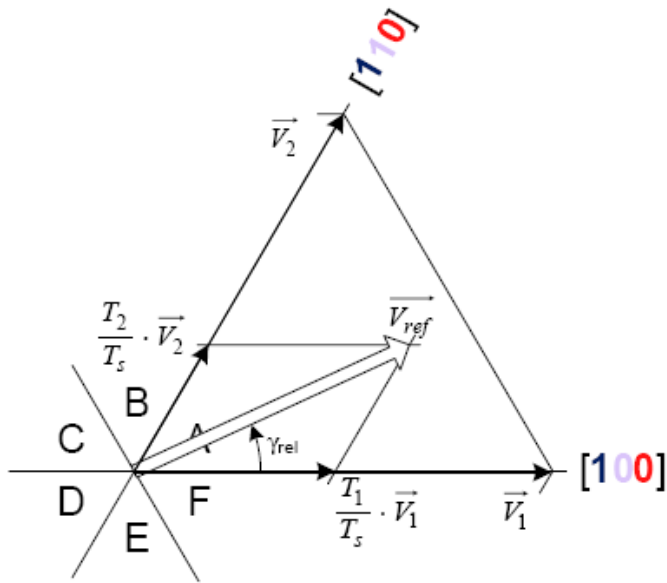


FOC的控制核心——SVPWM

■ 参考电压矢量合成

□ 利用基本电压空间矢量的线性时间组合得到定子参考电压 V_{ref} 。

eg. 位于A区



Sampling Period T_s :

$$T_s = T_1 + T_2 + T_0$$

Volt-Second Balancing:

$$\vec{V}_{ref} \cdot T_s = \vec{V}_1 \cdot T_1 + \vec{V}_2 \cdot T_2 + \vec{V}_0 \cdot T_0$$

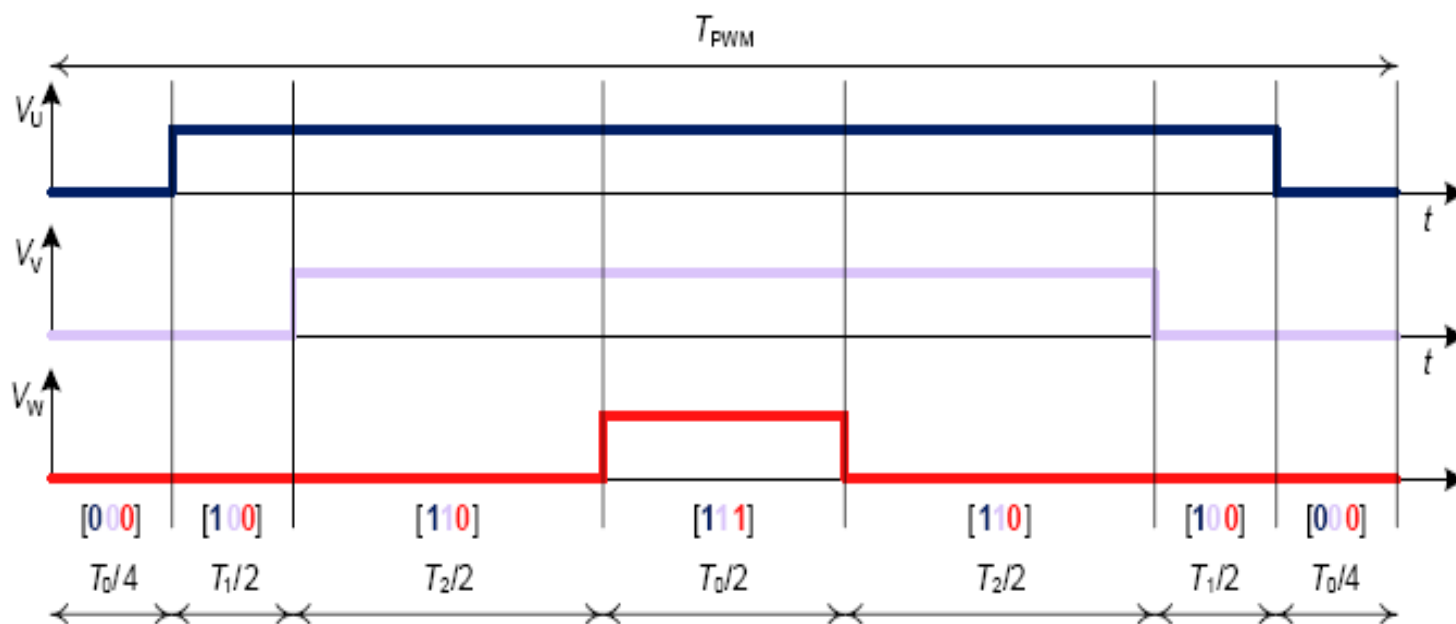
$$T_1 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_s \cdot V_{ref}}{V_{DC}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma_{rel}\right)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot T_s \cdot V_{ref}}{V_{DC}} \sin(\gamma_{rel})$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

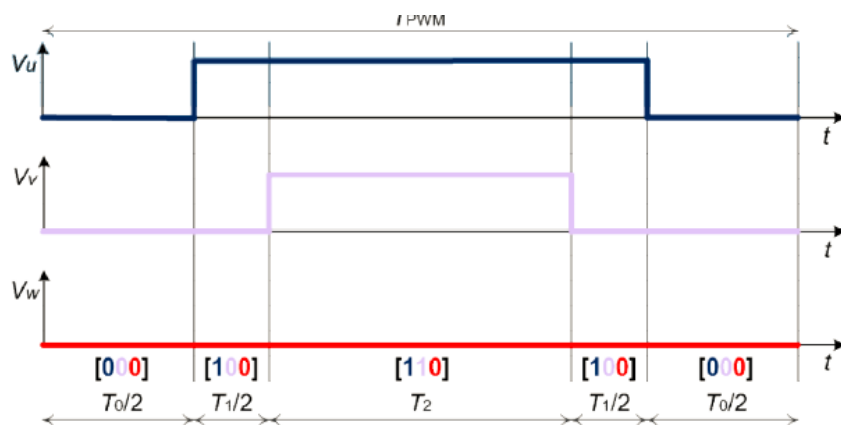
FOC的控制核心——SVPWM

- 七段式SVPWM，由3段零矢量和4段相邻的两个非零矢量组成。3段零矢量分别位于PWM的开始、中间和结尾。
- 非零电压空间矢量能使电机磁通空间矢量产生运动，而零电压空间矢量使磁通空间矢量静止

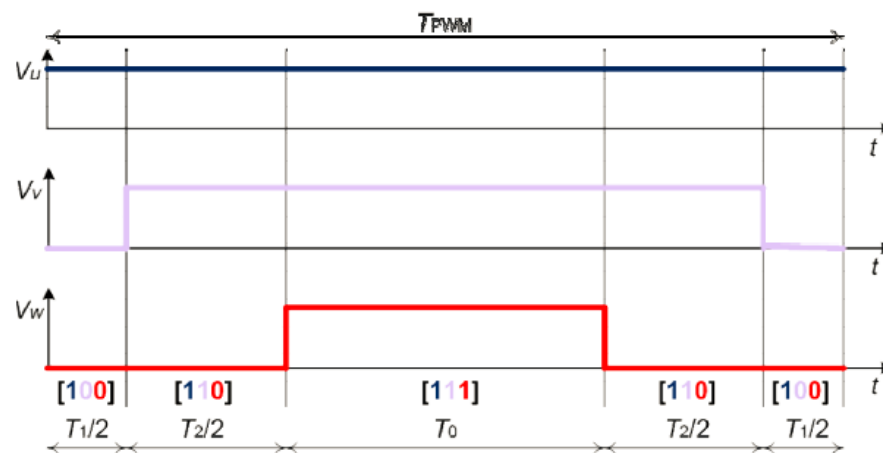


FOC的控制核心——SVPWM

- 五段式SVPWM，有两种方式。
- 为方便电流采样通常采用V0矢量方式。



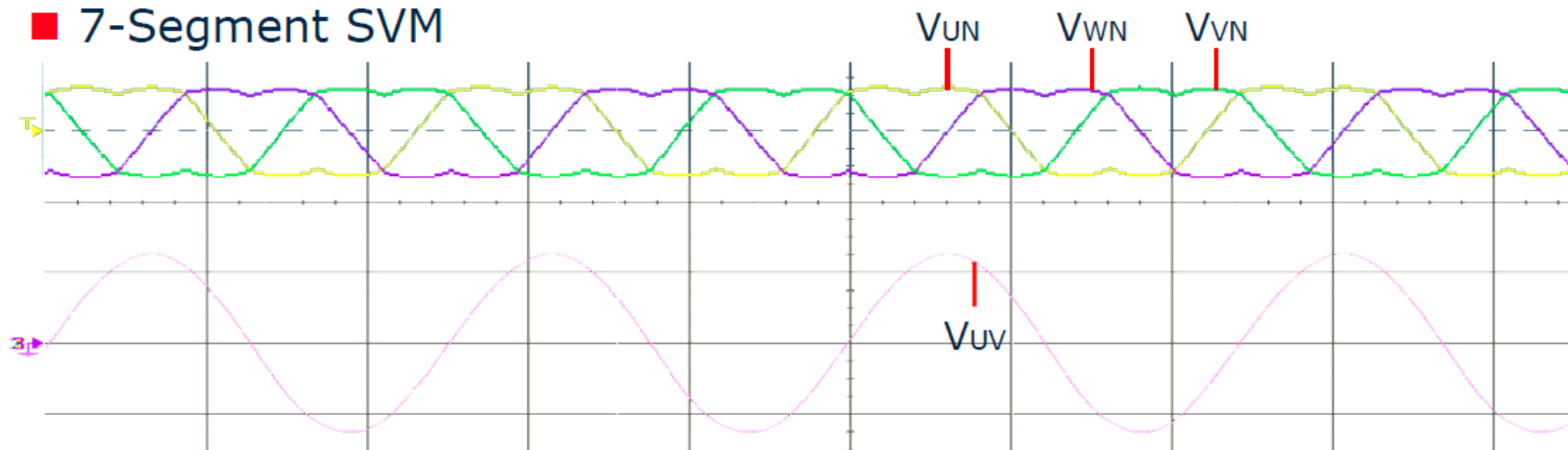
■ 使用V0矢量



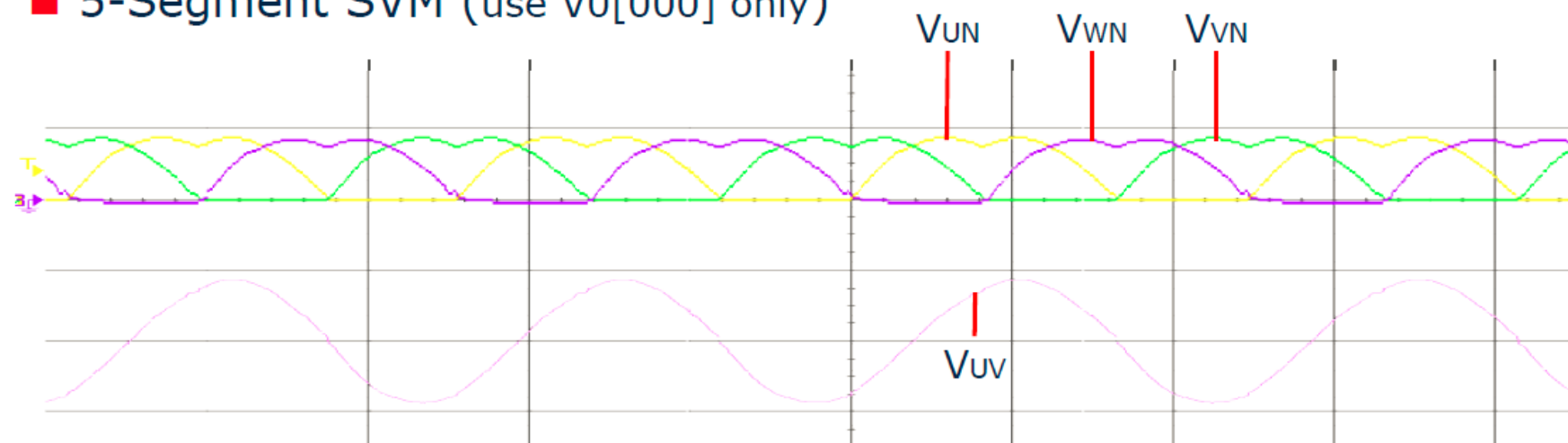
■ 使用V7矢量

7段SVPWM、5段SVPWM端电压对比

7-Segment SVM



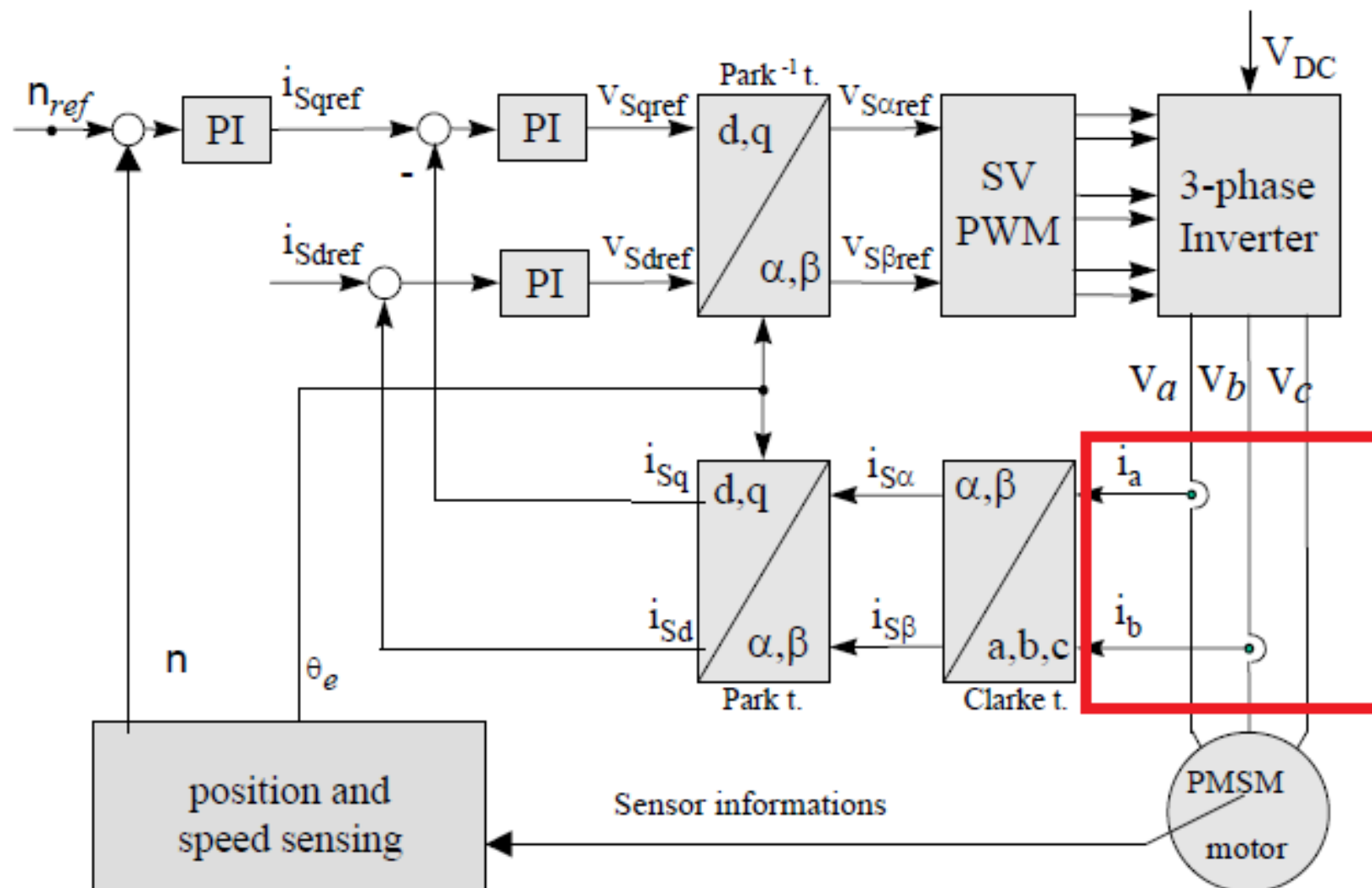
5-Segment SVM (use V0[000] only)



7段SVPWM、5段SVPWM选择

	比较内容	SVPWM模式	
		7段SVPWM	5段SVPWM
1	THD	较低，性能好	较高，性能差
2	开关损耗	较高	减少1/3
3	功率开关	多	少
4	调制波形	连续	不连续
5	母线电压利用率	一致	

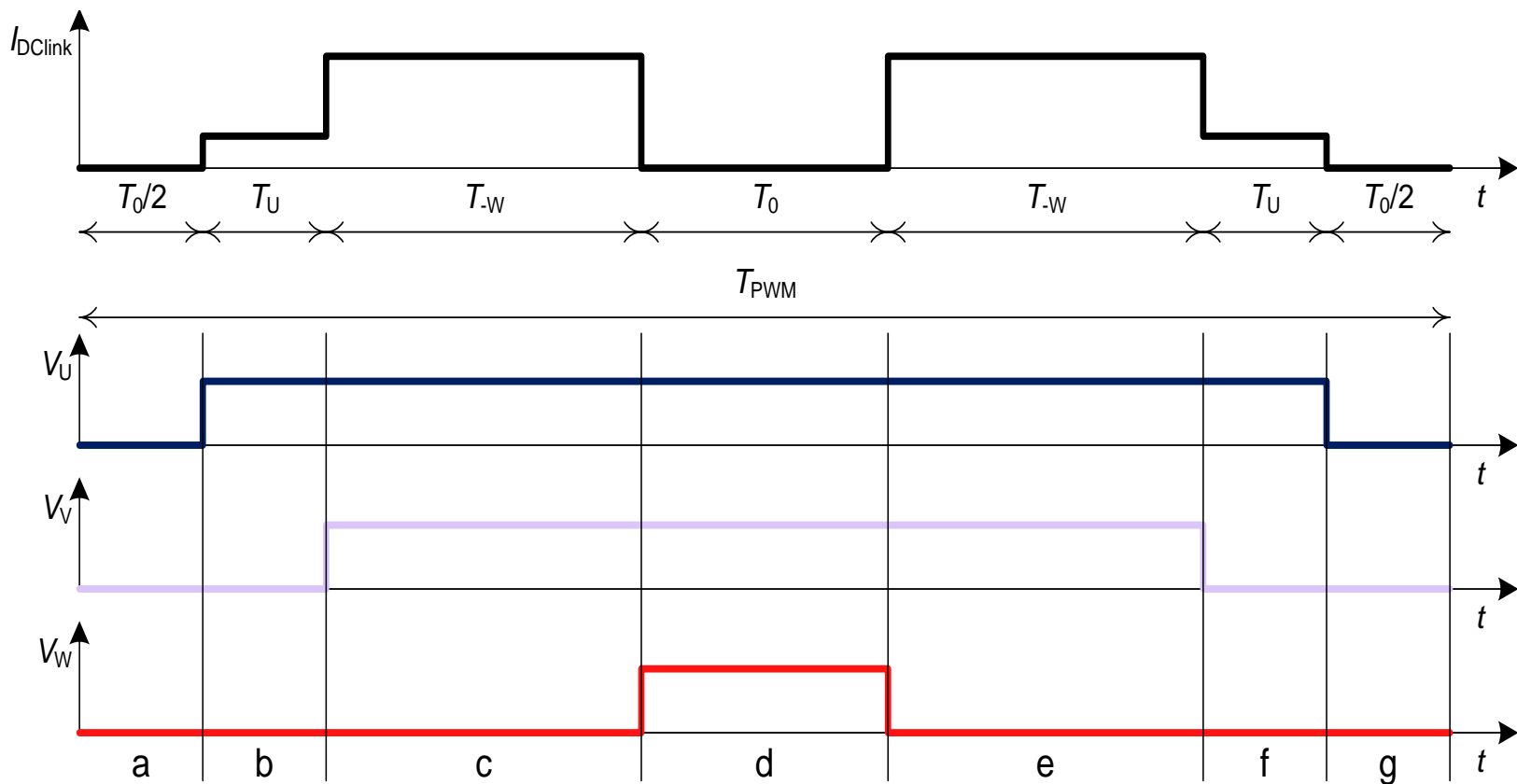
FOC的控制要素—电流采样输入



FOC的控制要素—母线电流

■ 母线电阻电流采样

□ SVPWM开关 VS 直流母线电流

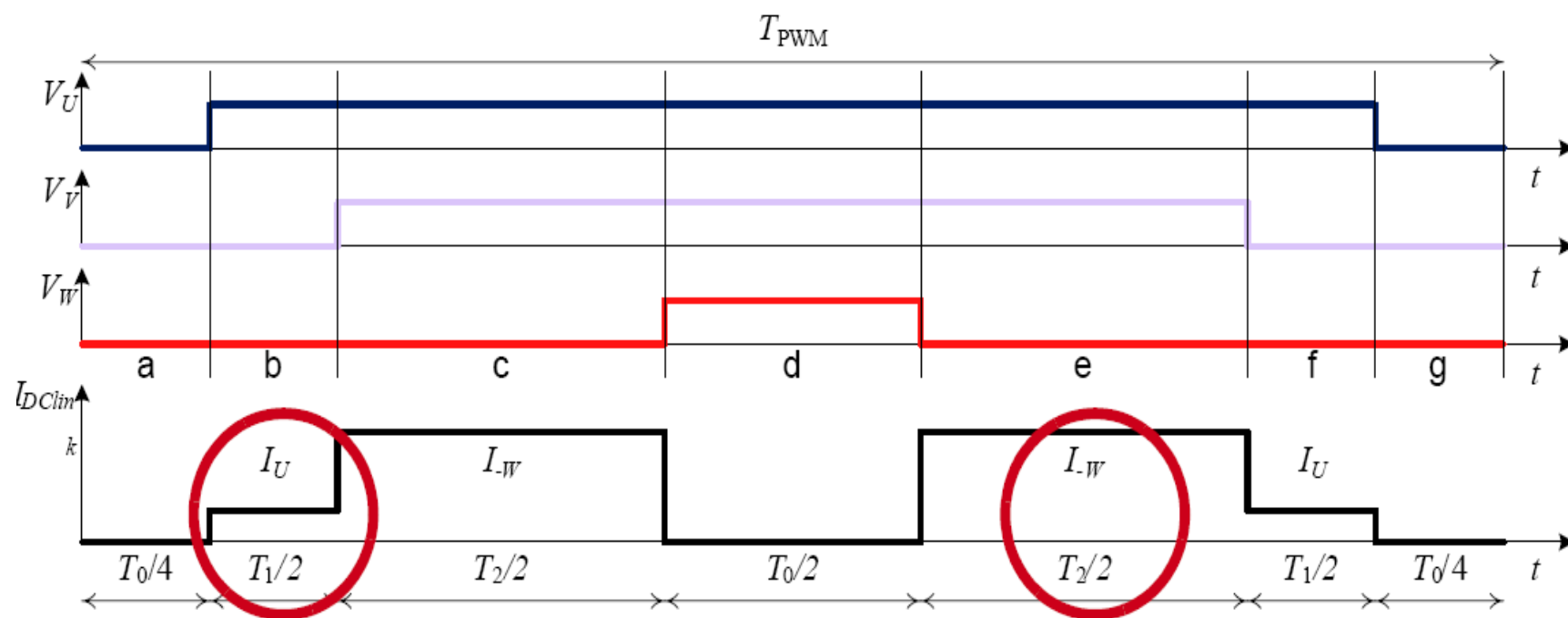


FOC的控制要素—母线电流还原相电流

■ 母线电阻电流采样

□ 通过直流母线侧一个电阻，实现一个周期内两相电流的测量，第三相电流由 $I_U + I_V + I_W = 0$ 得到。

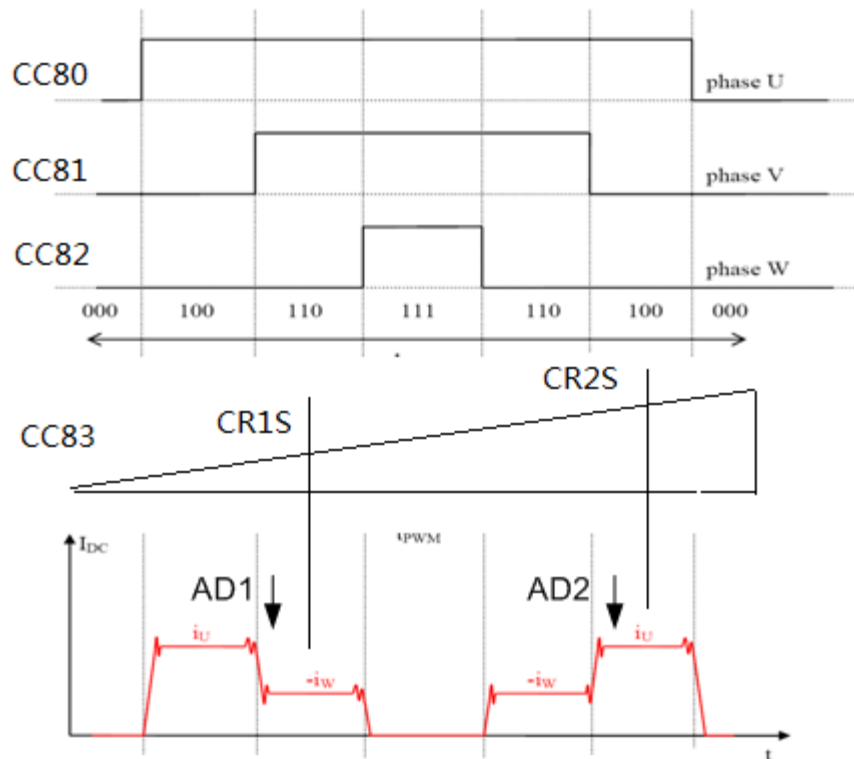
□ SVPWM开关 VS 直流母线电流



FOC的控制要素—相电流采样

■ 单电阻ADC采样

- SVPWM单直流母线电阻采样
- CC83 ST信号用来硬件触发ADC

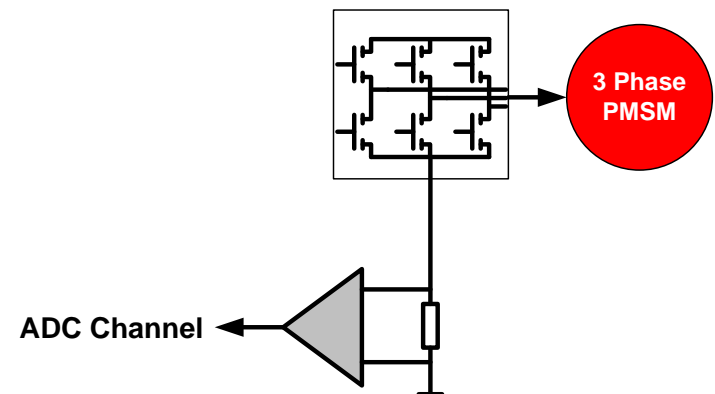


CC83信号连接

CCU80.ST3

CCU40.IN0H
CCU80.IN0P;
CCU80.IN1P;
CCU80.IN2P;
VADC0.BGREQGTF;
VADC0.G0REQGTF;
VADC0.G1REQGTF;

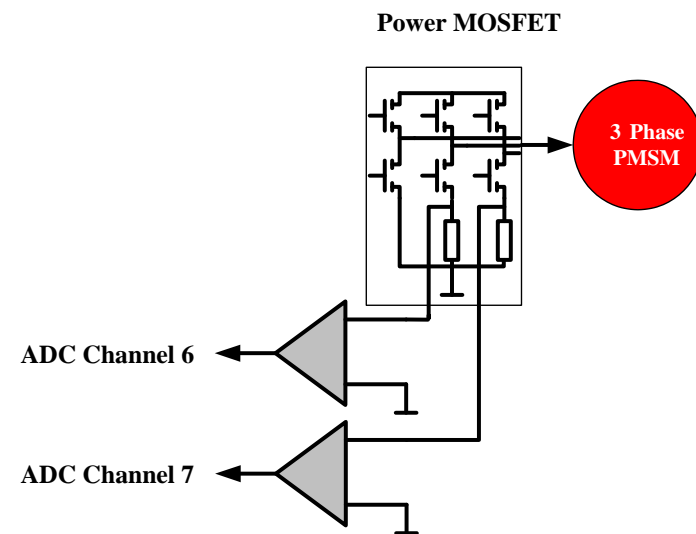
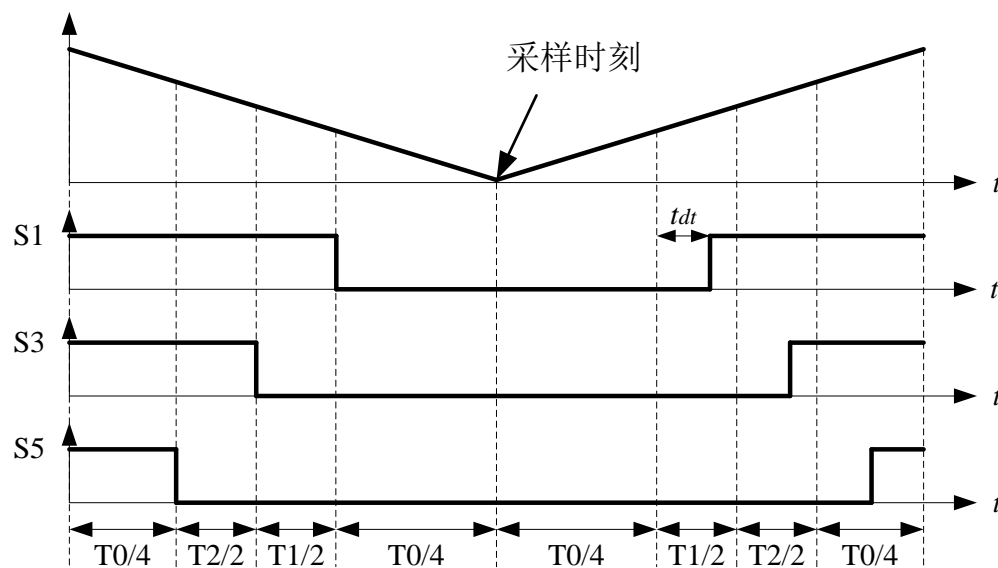
Power MOSFET



FOC的控制要素—桥臂电流采样

■ 双/三电阻电流采样

□ 桥臂电阻采样



电流采样方式选择

	比较内容	电流采样方式		
		母线电阻	双电阻	三电阻
1	MCU运算开销	大	小	中
2	支持电机运行范围	大	略低	大
3	硬件需求	1shunt+高带宽运放	2 shunt + 普通带宽轨到轨双运放	3shunt + 普通带宽轨到轨四运放
4	电路一致性	好	一般	差
5	电流还原效果	略差	好	好

FOC的控制要素—闭环控制

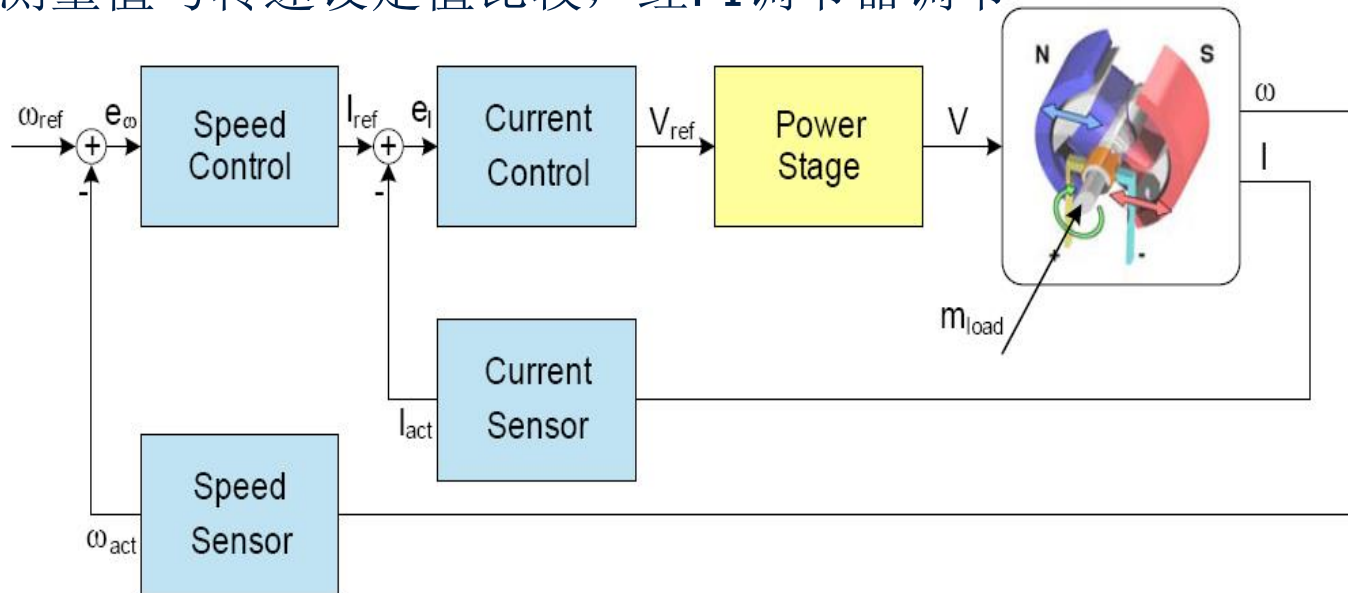
■ 速度和转矩闭环控制

□ 内环电流环

矢量控制算法分别控制d—q轴电流，采用PI调节器

□ 外环转速环

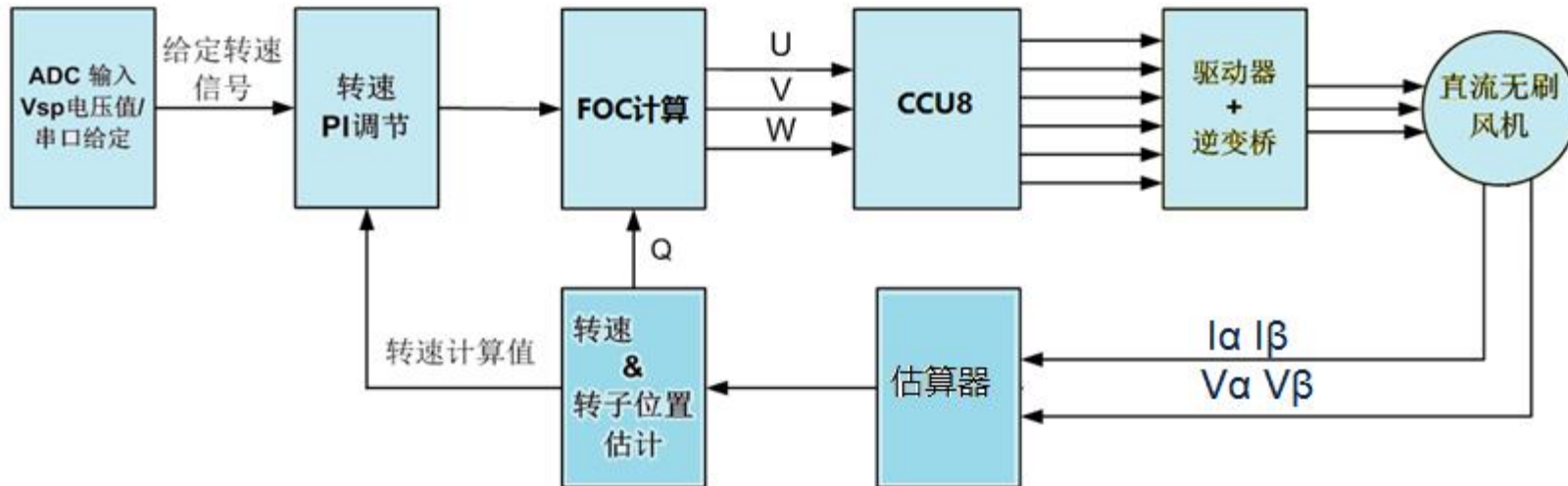
速度测量值与转速设定值比较，经PI调节器调节



主要内容

- 风机用直流无刷电机
- FOC的控制原理
- 无感FOC的控制原理

无感FOC的控制框图



■ 电机转子位置和速度信息来自估算器而不是传感器

无感FOC的控制核心——转子位置估算

■ PMSM电机模型

□ 静止坐标系下电压方程

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix}$$

□ $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}$ 为定子磁链,

$$\begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{f\alpha} \\ \psi_{f\beta} \end{bmatrix}$$

□ $\psi_{f\alpha}, \psi_{f\beta}$ 为转子磁链（旋转磁链）, $L_s \cdot i_{s\alpha}, L_s \cdot i_{s\beta}$ 为电感电势

无感FOC的控制核心——转子位置估算

■ 转子位置估算方式

□ 角度位置、速度估算

— 反正切法

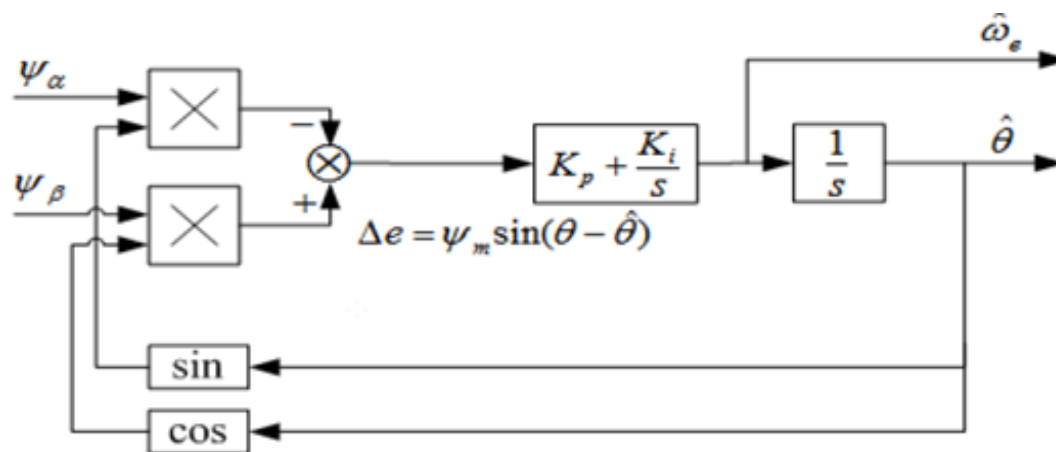
- 将计算得到的两相正交磁链直接反正切计算，得到转子角度
- 根据得到的角度，计算速度

— PLL锁相环法

- 将两相正交磁链输入二阶跟踪系统，通过闭环控制得到转子转速和位置信息

转子位置估算PLL

■ PLL 计算角度原理



$$\begin{aligned}\Delta e &= -\psi_\alpha \sin \hat{\theta} + \psi_\beta \cos \hat{\theta} \\ &= -\psi_m \cos \theta_e \sin \hat{\theta} + \psi_m \sin \theta_e \cos \hat{\theta} \\ &= \psi_m \sin(\theta_e - \hat{\theta})\end{aligned}$$

■ PLL 优势:

- 高频噪声有滤波作用
- 直接可以计算得到速度
- 角度突变较小（速度积分）

转子位置反正切估算

■反正切法

■ 角度位置计算

$$\theta = \arctan\left(\frac{\psi_{f\beta}}{\psi_{f\alpha}}\right)$$

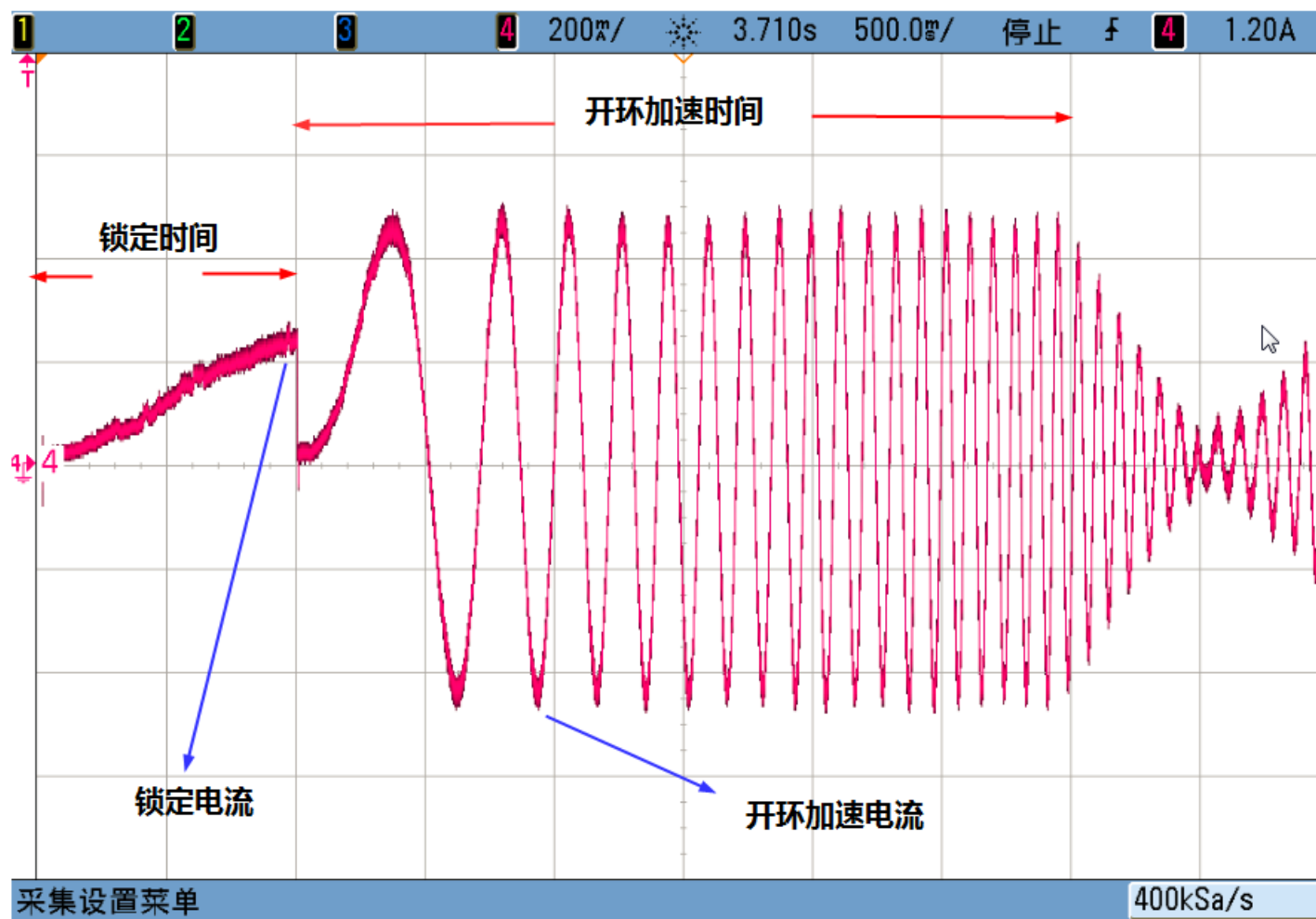
■ 速度估算

□ 对角位置进行差分计算，再经过一阶低通滤波计算速度

$$\bar{\omega}(k) = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{T_{speed}}$$

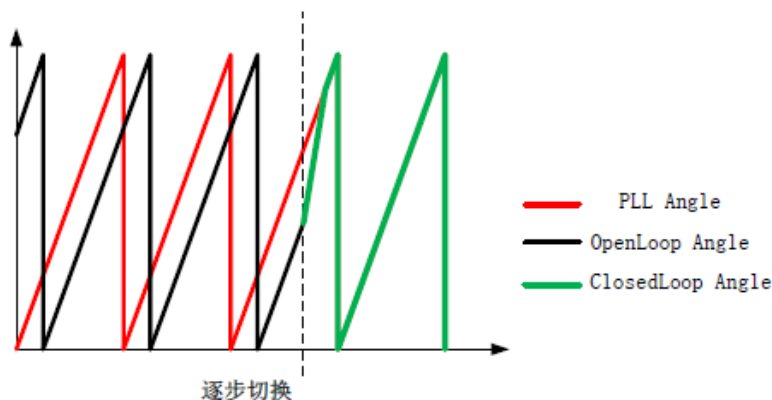
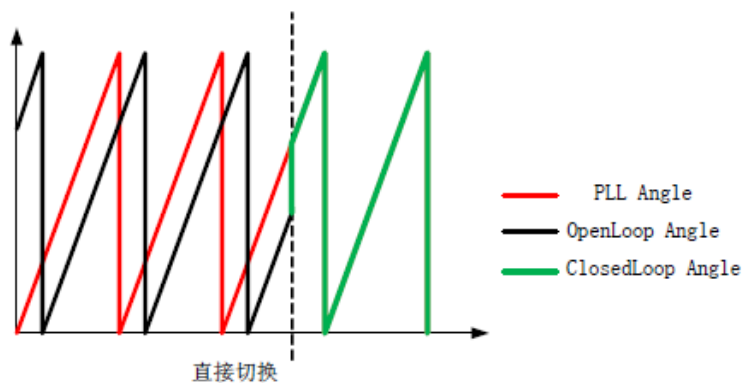
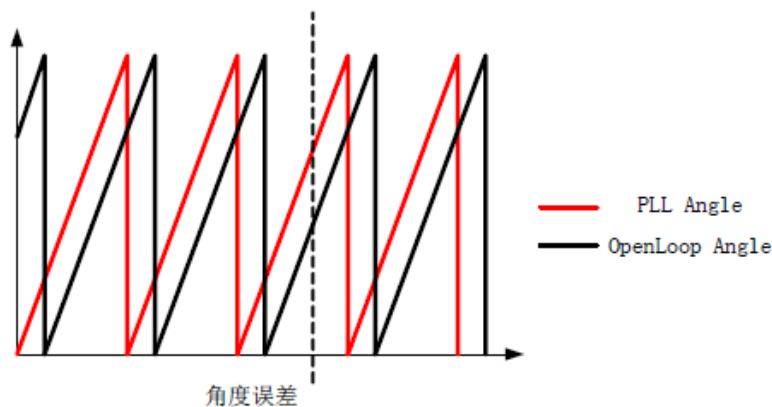
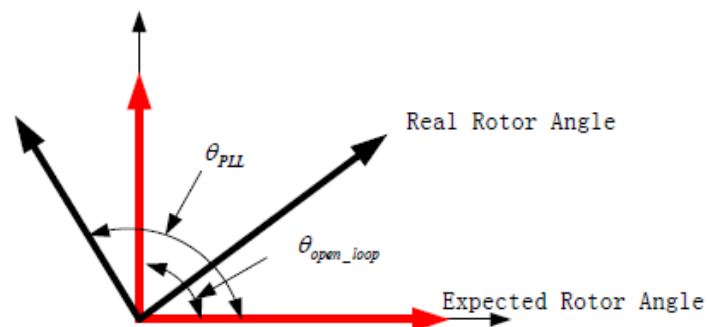
$$\omega(k) = \bar{\omega}(k) \frac{1}{1 + \tau_s s}$$

无感启动方式



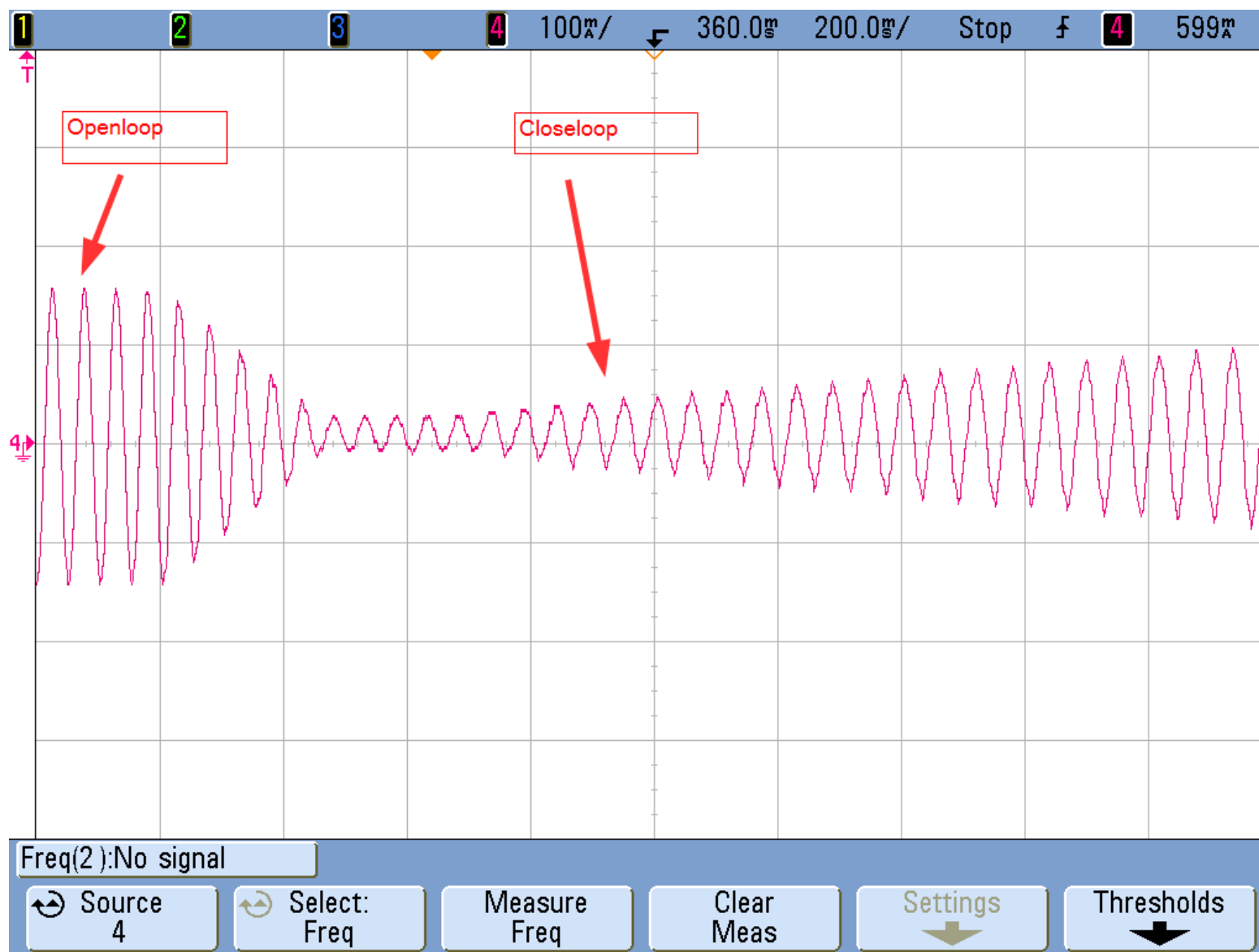
电机启动经历锁定、开环、闭环三种运行状态

启动---角度切换



- 从开环切换到闭环是关键步骤
- 采用逐步切换减小切换的电流变化

实验波形



ENERGY EFFICIENCY MOBILITY SECURITY

Innovative semiconductor solutions for energy efficiency, mobility and security.

